

КАЗАНСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В.И.УЛЬЯНОВА-ЛЕНИНА

На правах рукописи

ТАГИРОВ Мурат Салихович

ЯДЕРНАЯ МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ
ФЛУКТУАЦИЯМИ СВЕРХТОНКИХ ПОЛЕЙ

01.04.07 — физика твердого тела

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

КАЗАНЬ — 1992

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского государственного университета.


- | | |
|-----------------------|---|
| Научный консультант | — доктор физико-математических наук, профессор Теплов М.А. |
| Официальные оппоненты | — доктор физико-математических наук Буньков Ю.М. |
| | — член-корреспондент АН Татарстана, доктор физико-математических наук, профессор Зарипов М.М. |
| Ведущая организация | — Физико-технический институт низких температур АН Украины (г.Харьков) |

Защита состоится "12" ноября 1992 г. в 14³⁰ час.
на заседании специализированного Совета Д 053.29.02. при
Казанском государственном университете им. В.И.Ульянова-Ленина
(420008, г.Казань, ул.Ленина, 18).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке университета.

Автореферат разослан "12" октября 1992 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, профессор



Б.З.Малкин

Введение и актуальность проблемы. Вопросам ядерной магнитной релаксации в твердых телах посвящено большое количество работ, результаты которых отражены в многочисленных статьях и монографиях. В большинстве случаев удалось достигнуть ясного представления о релаксационных процессах, довести теорию до расчетных формул и получить неплохое качественное и количественное согласие с экспериментом. Вместе с тем, ряд вопросов оставались либо мало изученными, либо нерешенными вовсе. К таким "белым пятнам", исследованию которых посвящена данная работа, относятся нижеперечисленные проблемы.

1. При интерпретации спектров магнитного резонанса ядер редкоземельных (РЗ) ионов в ван-флековских парамагнетиках в диапазоне повышенных температур, при которых тепловая энергия kT становится достаточной для возбуждения $4f$ -электронной оболочки, представление о статистическом характере усреднения флуктуирующих сверхтонких магнитных полей нуждалось в строгом обосновании и экспериментальной проверке. В настоящей работе при исследовании ЯМР ^{169}Tm в монокристалле этилсульфата тулия в магнитном поле, параллельном оси c кристалла, установлено, что температурный сдвиг линии ЯМР и ее ширина могут быть описаны адиабатической теорией Андерсона-Вейса-Аминова в пределах малых времен корреляции случайного процесса перескока иона между основным синглетным и возбужденными электронными состояниями. Показано, что роль времени корреляции τ играет обратная вероятность перехода в единицу времени с возбужденных электронных состояний на основное. Малая величина времени τ , которая из экспериментов оценивалась как 10^{-9} с, позволила объяснить соотношение пропорциональности между статической восприимчивостью кристалла и сдвигом линии ЯМР.

2. Спин-решеточная релаксация (СРР) ядер РЗ ионов в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках экспериментально исследовалась сравнительно давно, однако до начала данной работы не существовало теории, удовлетворительно описывавшей релаксационные процессы при повышенных температурах. Обнаруженная во всех экспериментах экспоненциальная температурная зависимость скорости ядерной СРР $T_1^{-1} \propto \exp(-\Delta/kT)$ истолковывалась

известным из ЭПР способом как следствие двухфононной релаксации через возбужденное состояние $4f$ -электронной оболочки R_3 иона, отделенное от основного синглета энергетическим интервалом Δ . Все попытки объяснения экспериментальных данных были основаны на представлении о сугубо "одноионном" характере СРР и игнорировали тот факт, что в магнитно-концентрированных кристаллах ван-флековские ионы связаны между собой очень сильным диполь-дипольным взаимодействием, и именно это взаимодействие может определять время жизни электронного возбуждения и ширину электронных уровней энергии. В настоящей работе была детально изучена магнитная релаксация собственных ядер R_3 ионов с синглетным основным состоянием при повышенных температурах на примере "модельной системы" — этилсульфата тулия. Это способствовало созданию Л.К.Аминовым теории магнитной релаксации ядер R_3 ионов в ван-флековских парамагнетиках. Более того, проведение в ходе данной работы экспериментов обеспечило полную проверку теоретических представлений о релаксации при повышенных температурах.

3. Ядерная магнитная релаксация при сверхнизких температурах в диэлектриках вообще, и в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках в частности, продолжительное время оставалась практически неизученной. Главной причиной этого были технические трудности эксперимента (требовалась специальная криогенная техника). Однако, немалую роль играл пессимизм, который порождался теоретическими оценками скоростей релаксационных процессов через парамагнитные примеси: оценки давали астрономически длинные времена ядерной СРР в диэлектрических кристаллах при сверхнизких температурах. Согласно существующим теоретическим представлениям, в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках, как и в обычных диэлектриках, ядерная релаксация должна "вымораживаться" вследствие поляризации электронных моментов парамагнитной примеси. Теоретические оценки оставляли единственную надежду на то, что при сверхнизких температурах и сильных магнитных полях действующим, хотя и слабым, будет прямой процесс спин-решеточной релаксации ядер R_3 ионов. В настоящей работе было предпринято исследование магнитной релаксации ядер тулия в этилсульфате тулия при сверхнизких температурах в широком диапазоне величин магнитного поля. Анализ эксперимен-

тальных данных позволил сделать вывод о существовании неизвестного механизма релаксации, который является более эффективным, чем спин-диффузионный процесс переноса энергии к поверхности образца и прямой ядерный процесс релаксации.

4. Релаксационные процессы, которые происходят в ядерных спин-системах твердого тела и жидкого ^3He при низких и особенно при сверхнизких температурах, оказываются в достаточной степени связанными. Исследованию проблемы этой магнитной связи посвящено большое количество работ, однако ясности в этом вопросе до настоящего времени нет. В данной работе экспериментально исследована релаксация жидкого ^3He в контакте с диэлектрическими ван-Флековскими парамагнетиками. В результате исследований обнаружена резонансная магнитная связь между ядрами жидкого ^3He и ^{169}Tm в кристаллах. Обнаруженное явление открывает новые возможности в использовании диэлектрических ван-Флековских парамагнетиков для магнитного охлаждения жидкого He и растворов ^3He - ^4He .

5. Ядерный магнитный резонанс и релаксация в магнитоупорядоченных (ферро- и антиферромагнитных) веществах систематически исследовались во многих лабораториях мира. Однако, в большинстве экспериментов объектами исследования были вещества, в которых магнитные ионы связаны друг с другом сильным обменным взаимодействием, а большой класс кристаллов, в которых доминирующую роль играет диполь-дипольное взаимодействие магнитных ионов, оставался малоизученным. В частности, неясно было, в какой степени существующие теоретические представления ядерной спин-решеточной релаксации через парамагнитные ионы (примеси) окажутся пригодными для интерпретации результатов экспериментов с магнитно-концентрированными кристаллами, в которых флуктуирующие магнитные поля на всех ядрах диамагнитных гомов велики и ядерная спиновая диффузия не играет большой роли. Аналогичные вопросы оставались и в отношении спин-спиновой релаксации ядер: а priori казалось ясным только то, что сильные статические молекулярные поля должны способствовать "развязке" спиновых подсистем кристаллографически эквивалентных групп ядер, а флуктуирующие компоненты молекулярного поля - напротив, объединению ядерных спиновых подсистем. Приступая к экспериментам с дипольными изинговскими фер-

ромагнетиками - этилсульфатами тербия и диспрозия, мы имели в виду не только получить ответы на поставленные выше вопросы, но надеялись также на то, что, освоив процедуру извлечения времен корреляции флуктуаций молекулярных полей из данных ЯМР, мы сумеем дать оценки скоростей спин-спиновой релаксации РЗ-ионов и тем самым приблизиться к пониманию того, как осуществляется спин-спиновая релаксация в системе электронных дипольных моментов, не имеющих поперечных компонент. Результаты наших экспериментов позволили получить ответы на эти и другие (связанные с ними) вопросы.

6. Несмотря на очень интенсивные исследования квадрупольного резонанса и ядерной магнитной релаксации в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) в течение последних нескольких лет, к настоящему времени так и не удалось сформировать полную картину резонансных явлений. Помимо частных проблем, таких как идентификация спектральных линий, происхождение градиентов электрических полей, центральной остается проблема магнитной релаксации. В настоящей работе приведены данные экспериментальных исследований магнитной релаксации ядер меди в соединениях типа "1-2-3" с различным содержанием кислорода и парамагнитной примеси Yb^{3+} . Был обнаружен ряд особенностей в магнитной релаксации ядер меди, среди которых можно выделить уменьшение скорости поперечной релаксации ^{63}Cu в медь-кислородных плоскостях при $T < T_c$ и аномалию в температурной зависимости $T_2^{-1}(T)$ вблизи $T=35\text{K}$.

Как видно, все исследованные в работе вещества объединяет одно общее свойство - сильная корреляция электронных моментов.

Настоящая работа имела целью установление закономерностей в ядерной магнитной релаксации, обусловленной флуктуациями сверхтонких полей, путем систематического исследования методами импульсного ЯМР ван-Флека парамagneticов TmES и LiTmF_4 , изинговских ферромагнетиков TbES и DyES , жидкого ^3He в пористом ориентированном порошке LiTmF_4 , TmPO_4 и на поверхности монокристалла TmES , высокотемпературных сверхпроводников $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{Y}_x\text{Yb}_{1-x}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Научная новизна и практическая ценность работы состоят в том, что:

1. Установлен механизм ядерной магнитной релаксации

ван-флековских парамагнетиках в условиях быстрых флуктуаций сверхтонких магнитных полей вследствие релаксационных переходов 4f-электронов между основным и возбужденными состояниями.

2. Впервые на основе данных ЯМР произведена оценка скоростей электронной спин-спиновой релаксации в кристаллах с сильной магнитной анизотропией.

3. Обнаружена резонансная магнитная связь на границе между жидким ^3He и ^{169}Tm в TmES .

4. Предложена модель углового распределения частиц в магнитно-ориентированных порошках.

5. Впервые дана оценка времени корреляции флуктуаций сверхтонких магнитных полей на ядрах меди в ВТСП.

Работа имеет практическую ценность, поскольку ее результаты могут быть использованы (а часть их уже использована) для развития теоретических представлений о магнитных электронно-ядерных взаимодействиях в твердых телах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Первом Советско-Индийском симпозиуме по актуальным проблемам спектроскопии магнитного резонанса (Душанбе, 1982 г.), на Советско-Финском симпозиуме по физике твердого тела и низких температур (Звенигород, 1984 г.), на Всесоюзной конференции по магнитному резонансу в конденсированных средах (Казань, 1984 г.), на 17 Международной конференции по физике низких температур (Карлсруе, 1984 г.), на 1-ой и 2-ой Всесоюзных конференциях по квантовой химии и спектроскопии твердого тела (Свердловск, 1984 г., 1986 г.), на 23-м, 24-м, 25-м, 26-м, 29-м Всесоюзных совещаниях по физике низких температур (Таллин, 1984 г., Тбилиси, 1986 г., Ленинград, 1988 г., Донецк 1990 г., Казань 1992 г.), на Бакурианских коллоквиумах по сверхтекучести и квантовым кристаллам (Бакуриани, 1986 и 1987 гг.), на IX-ой летней школе АМПЕР (Новосибирск, 1987 г.), на 1-м, 2-м, 3-м и 4-м Республиканских семинарах по физике и технике сверхнизких температур (Донецк, 1983 г., 1985 г., 1987 г., 1989 г.), на I Всесоюзном совещании по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (Москва, 1985 г.), на Рабочем совещании по проблемам высокотемпературной сверхпроводимости (Свердловск, 1987 г.), на 2-ой международной конференции по современным методам радиоспектро-

скопии (Рейнхардсбрюн, 1985 г.), на Международном симпозиуме по физике сверхнизких температур (Кошице, 1989 г.), на 1-м, 2-м и 3-м Всесоюзных совещаниях по высокотемпературной сверхпроводимости (Харьков, 1988 г., Киев, 1989 г., Харьков, 1991 г.), на Всесоюзной конференции "Применение магнитного резонанса в народном хозяйстве" (Казань, 1989 г.), на Международном симпозиуме по высокотемпературной сверхпроводимости (Дубна, 1989 г.), на X Международном симпозиуме по эффекту Яна-Теллера (Кишинев, 1989 г.), на VIII Международной конференции по сверхтонким взаимодействиям (Прага, 1989 г.), на Советско-Западногерманском семинаре по высокотемпературной сверхпроводимости (Таллинн, 1990 г.), на 25-м и 26-м конгрессах АМЛЕР (Штутгарт, 1990 г., Афины, 1992 г.), на Международной конференции ВТСП-ЛЯ (Москва, 1991 г.), а также на совместных итоговых конференциях КГУ и КФАН СССР в 1982 г., 1984 г., 1986 г., 1987 г., 1989 г.

Содержание работы отражено в 51 публикации.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования ядерной магнитной релаксации тулия в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках $TmES$ $LiTmF_4$, которые в значительной мере стимулировали развитие теории релаксации ядер ван-флековских ионов при повышенных температурах, обеспечили проверку ее основных положений и оценку времен корреляции флуктуаций сверхтонких магнитных полей.

2. Результаты экспериментального исследования ядерно магнитной релаксации тулия в $TmES$ при сверхнизких температурах.

3. Обнаружение резонансной магнитной связи на границе диэлектрический ван-флековский парамагнетик-жидкий 3He и результаты исследования магнитной релаксации в магнитно ориентированных порошках $LiTmF_4$ и $TmPO_4$.

4. Результаты исследования методом импульсного ЯМР статических и флуктуирующих внутренних магнитных полей в изинговских ферромагнетиках $TbES$ и $DyES$. Оценка на основе сопоставления эксперимента и теории времен корреляции флуктуирующих внутренних магнитных полей.

5. Выявление закономерностей и особенностей в магнитной релаксации ядер меди в высокотемпературных сверхпроводниках

$\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

Структура работы. Диссертация содержит шесть глав, 56 рисунков, 17 таблиц и список литературы, включающий 165 наименований. Полный объем работы составляет 205 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой, вводной главе дается общая характеристика работы. В начале этой главы показывается актуальность диссертационной работы, определяется ее цель, приводятся аргументы в пользу ее научной новизны и практической ценности.

Вторая глава посвящена описанию электронной и криогенной аппаратуры, использование которой позволило провести экспериментальные исследования в широких интервалах температур (0,045-300 К), частот (3-160 МГц) и магнитных полей (0-60 кЭ). Здесь же описана процедура приготовления магнитно-ориентированных порошков. Заключительный раздел этой главы посвящен методике измерения времен ядерной магнитной релаксации.

Третья глава посвящена ядерной магнитной релаксации в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках. В начале приводятся основные результаты экспериментальных и теоретических исследований, которые были получены к началу выполнения настоящей работы, то есть к 1981 году. Анализ этих результатов позволяет очертить круг нерешенных проблем, к которым относятся:

1. Установление механизма формирования спинового эха ядер РЗ ионов в однородном внешнем магнитном поле;
2. Строгое обоснование подхода, в соответствии с которым шаг линии ЯМР должен быть пропорционален парамагнитной восприимчивости кристалла.
3. Установление механизма релаксации ядер РЗ ионов при вышенных температурах.

Для проведения полного анализа всех механизмов уширения линий и корректного сопоставления теории с экспериментом была оведена серия экспериментов с "модельной системой" - этил-сульфатом тулия TmES . Было установлено, что второй момент M_2 линии ЯМР ^{169}Tm в поле H_0 на частоте 3,9 МГц складывается из $M_2^{\text{H}} = 0,04 M_2$, $M_2^{\text{H}} = 0,56 M_2$, $M_2^{\text{Tb}} + M_2^{\text{Er}} = 0,25 M_2$ и $M_2^{\alpha} = M_2$, где

три первых слагаемых представляют собой вклады в M_2 за счет диполь-дипольных взаимодействий ядер тулия друг с другом, ядрами протонов и парамагнитными примесями Tb^{3+} и Er^{3+} . Последнее слагаемое M_2^α соответствует недипольному вкладу, обусловленному разбросом величин парамагнитного сдвига из-за локальных искажений кристаллического электрического поля. Из сопоставления приведенных значений видно, что наибольший вклад в ширину линии ЯМР ^{169}Tm в $TmES$ обязан разбросу локальных парамагнитных полей от протонов. Этот вклад является доминирующим почти во всех ориентациях кристалла в магнитном поле ($1,5^\circ < \theta < 90^\circ$) и позволяет наблюдать спиновое эхо ядер ^{169}Tm в однородном внешнем поле. Вблизи ориентации $H_0 \parallel c$ наблюдать эхо удается лишь в неоднородном внешнем поле.

Существует еще одна особенность ЯМР ^{169}Tm в $TmES$ при ориентации $H_0 \parallel c$. В этой ориентации эффективное поле на ядрах ^{169}Tm при переходе его 4f-электронной оболочки в возбужденное состояние меняется лишь по величине, сохраняя направление, расщепление электронного дублета $\hbar\Omega$ превышает ширину уровней энергии иона Tm^{3+} . Адиабатические условия, которые при этом реализуются, допускают применение модифицированной Л.К.Аминским теории Андерсона-Вейса, основанной на модели случайного изменения резонансных частот. В случае быстрых флуктуаций ($\tau\Delta\omega \ll 1$, где τ - время корреляции флуктуаций, $\Delta\omega$ - изменение частоты, обусловленное переходами иона Tm^{3+} между тремя нижними штарковскими уровнями энергии) теория дает следующую температурную зависимость парамагнитного сдвига:

$$\delta\alpha_{\parallel}^T = \frac{\Delta\omega}{1+\Delta\omega^2\tau^2} \cdot \frac{\hbar\Omega}{\gamma_I H_0 kT} \cdot \exp(-\Delta/kT) = (42/T) \exp(-\Delta/kT),$$

которая хорошо согласуется с температурной зависимостью, полученной из наших экспериментов

$$\delta\alpha_{\parallel}^3 = (100/T) \exp(-\Delta/kT).$$

Что касается ширины линии, то расчетная кривая, определяемая соотношением

$$\delta\nu_{\parallel}^T = \frac{2\Delta\omega^2\tau}{1+\Delta\omega^2\tau^2} \cdot \frac{1}{\pi\sqrt{3}} \exp(-\Delta/kT),$$

неплохо согласуется с экспериментально установленным законом $\delta\nu_{\parallel}^3 (\text{Гц}) = 1,3 \cdot 10^8 \exp(-\Delta/kT)$. Это свидетельствует о том, что в нашем случае реализуется условие $\tau_c^{-1} \gg |\Delta\omega|$, а сама величина

оказывается равной $3,4 \cdot 10^{-10}$ с. Роль времени корреляции при повышенных температурах играет обратная вероятность перехода в единицу времени с возбужденных электронных состояний на основное.

В общем случае, когда магнитное поле направлено произвольно относительно осей кристалла, условие адиабатичности нарушается, так как эффективное поле на ядре ^{169}Tm меняется и по величине, и по направлению. Эта ситуация во многом аналогична релаксационным процессам в жидкости. Форма гамильтониана флуктуирующего сверхтонкого взаимодействия $AJ(t)I$ навела на мысль о наличии известной "скалярной релаксации" 2-го рода. Модификация неадиабатической теории Редфилда и Блоха-Вангснесса применительно к анизотропным системам $J(t, \theta)$ была выполнена И.К. Аминовым. В соответствии с этой теорией, скорости релаксации ядер тулия в аксиальных ван-Флековских парамагнетиках определяются следующими выражениями:

$$T_1^{-1} = \frac{2A_J^2}{h^2 \tau_c} \sin^2 \theta' \left[a^2 + b^2 \omega_0^2 (9 \cos^2 \theta' + \frac{1 + \cos^2 \theta'}{1 + \Omega^2 \tau_c^2}) \right] \exp(-\Delta/kT),$$

$$T_2^{-1} = \frac{1}{2} T_1^{-1} + \frac{2A_J^2}{h^2 \tau_c} \left[a^2 \cos^2 \theta' + b^2 \omega_0^2 \sin^4 \theta' (9 + \frac{1}{1 + \Omega^2 \tau_c^2}) \right] \exp(-\Delta/kT),$$

где $a = \langle d_1 | J_z | d_1 \rangle$, $b = 2g \mu_B \langle d | J_x | o \rangle^2 / \gamma_I \Delta$,

$$\sin^2 \theta' = \sin^2 \theta \left[\frac{\gamma_I^2}{\gamma_{\parallel}^2 \cos \theta + \gamma_I^2 \sin^2 \theta} \right].$$

нализ результатов наших экспериментов, в которых измерялись $T_1^{-1}(T, \theta)$ и $T_2^{-1}(T, \theta)$, с помощью приведенных выше формул позволил дать оценку величины τ_c для кристаллов TmES ($7 \cdot 10^{-11}$ с) и TMF_4 ($8,5 \cdot 10^{-12}$ с). Согласие расчетных величин с экспериментом демонстрируют рисунки 1 и 2.

Последний раздел данной главы посвящен исследованию магнитной релаксации ядер ^{169}Tm в TmES при сверхнизких температурах. Наиболее удобным методом измерения оказался стационарный ЯР с использованием Q-метра. Вначале регистрировался сигнал

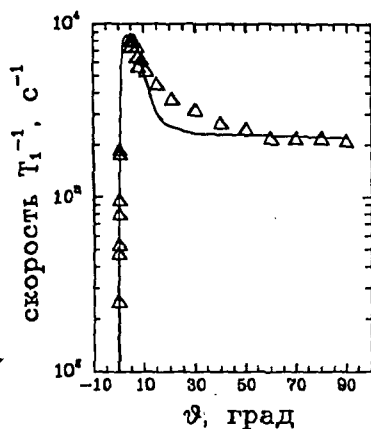


Рис. 1. Угловая зависимость скорости продольной релаксации ядер ^{169}Tm в TmES при $T = 4,25\text{K}$. Сплошная линия - результат расчета по теории Аминова.

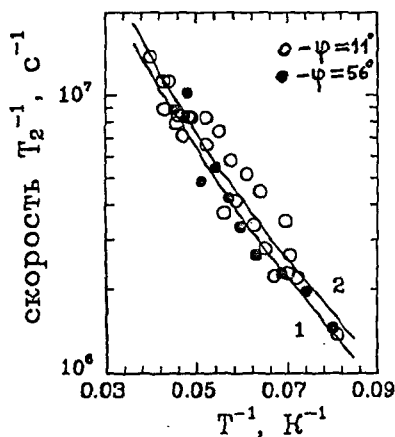


Рис. 2. Температурная зависимость скорости поперечной релаксации ядер ^{169}Tm в LiTmF_4 ; $\nu = 161\text{МГц}$, H_2O 1 с. Кривые 1 и 2 - результат расчета по теории Аминова с $\tau_c = 7,2 \cdot 10^{-12}\text{с}$ и $\tau_c = 8,5 \cdot 10^{-12}\text{с}$

A_1 , соответствующий равновесной намагниченности ядер ^{169}Tm при температуре T_m в слабом магнитном поле H_0^1 , затем образец выдерживался в течение времени t в сильном магнитном поле H_0^2 , после чего в поле H_0^1 регистрировался сигнал $A_2(t)$, усиленный за счет процессов поляризации в сильном магнитном поле. Предполагая, что процесс релаксации ядер ^{169}Tm описывается выражением

$$(A_0^0 - A_2(t)) / (A_2^0 - A_1) = \exp(-t/T_1),$$

где $A_2^0 = A_1 \text{th}(\gamma \hbar H_0^2 / 2kT_m) / \text{th}(\gamma \hbar H_0^1 / 2kT_m) \approx A_1 \text{th}(\gamma \hbar H_0^2 / 2kT_m) 2kT_m / \gamma \hbar H_0^1$, можно оценить величину T_1 . На первом этапе экспериментов исследовался монокристалл TmES в форме шарика с диаметром 5 мм, на втором этапе - порошок TmES со средним размером частиц 50 микрон. Анализ экспериментальных результатов показал, что время релаксации продольной намагниченности ядер тулия составляет $2,5 \cdot 10^4$ с и не зависит от температуры ($70 \pm 100\text{K}$), магнитного поля (3 ± 59 кЭ) и размера образца. В заключении делается вывод о существовании неизвестного механизма релаксации, который является доминирующим в диэлектрических ван-Флековских парамагнетиках при сверхнизких температурах.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию ядерной магнитной релаксации жидкого ^3He , находящегося в контакте с поверхностью диэлектрических ван-Флековских парамагнетиков TmES , LiTmF_4 и TmPO_4 . Все указанные вещества отличает сильная анизотропия намагниченности ядер ^{169}Tm , которая позволяет при определенной ориентации магнитного поля относительно кристаллографической оси c ($\theta \approx 7^\circ$) получить гиромангнитное отношение ^{169}Tm в точности равным гиромангнитному отношению ^3He , обеспечив тем самым необходимое условие для кросс-релаксационных процессов между этими спинами. На первом этапе экспериментов использовался монокристалл этилсульфата тулия в виде цилиндра, окруженного тонким ($\approx 0,1$ мм) слоем жидкого ^3He . В силу существенного различия параметров импульсного ЯМР нам удалось дифференцировать сигналы спинного эха ядер ^{169}Tm (длительности импульсов $\tau_{1,2} = 1$ мкс; $T_2 = 25$ мкс) и ядер ^3He ($\tau_{1,2} = 10$ мкс, $T_2 = 25$ мс) и измерить при температуре $T = 1,5\text{K}$ релаксацию продольной намагниченности ядер жидкого ^3He и ядер ^{169}Tm в кристалле TmES . Результаты экспериментов приведены на рис. 3 и 4.

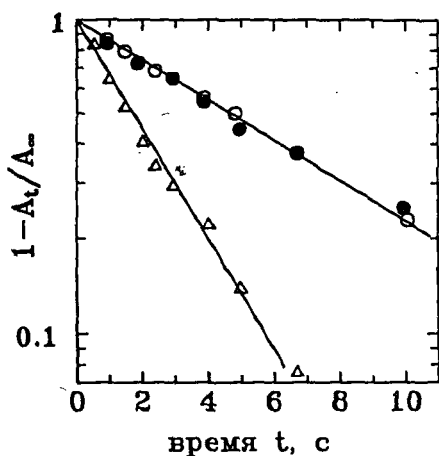


Рис. 3. Релаксация продольной намагниченности ядер жидкого ^3He при $T=1,5\text{K}$: Δ - $\theta=\theta_{kp}=7^\circ03'$, $T_1=2,4\text{с}$;
 \circ - $\theta=7^\circ30'$, \bullet - $\theta=6^\circ30'$, $T_1=6,5\text{с}$.

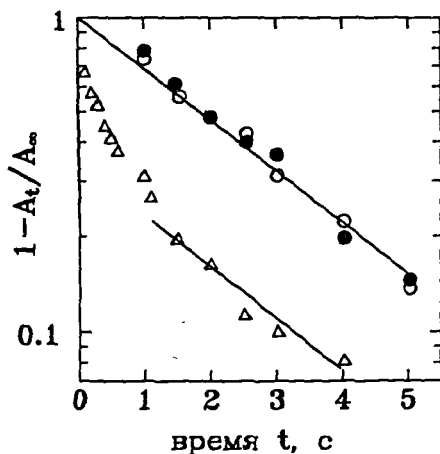


Рис. 4. Релаксация продольной намагниченности ядер ^{169}Tm в кристалле TmES , окруженном слоем жидкого ^3He , при $T=1,5\text{K}$, $\nu=13,4\text{МГц}$:
 Δ - $\theta=\theta_{kp}=7^\circ03'$, $T_1'=0,4\text{с}$, $T_1''=2,6\text{с}$;
 \circ - $\theta=7^\circ30'$, \bullet - $\theta=6^\circ30'$, $T_1=2,6\text{с}$.

как видно из рисунков, при ориентации $\theta=7^{\circ}03'$ наблюдается резонансная магнитная связь между спинами ^3He и ^{169}Tm .

В дальнейших экспериментах монокристалл TmES был заменен на магнитно-ориентированный порошок LiTmF_4 , так как это вещество было более химически стойким и имело более развитую поверхность. В экспериментах были использованы порошки LiTmF_4 с характерным размером частиц <57 мкм (образец I), <20 мкм (II), <4 мкм (III), и <1 мкм (IV). Дополнительные эксперименты были проведены с порошками LiYF_4 (V) и TmPO_4 (VI) с размером частиц <57 мкм. Во всех образцах, кроме пятого, наблюдалось спиновое взаимодействие ядер ^3He в однородном внешнем поле, которое при фиксированной частоте было на 15 Э ($H_0 \parallel c'$) и на 46 Э ($H_0 \perp c'$) больше, чем в LiYF_4 . Здесь c' — есть направление преимущественной ориентации кристаллографических осей c . Результаты части экспериментов приведены на рисунках 5 и 6. Наблюдаемую анизотропию в релаксации поперечной намагниченности ядер ^3He [так, например, для II образца $T_1^{-1}(H_0 \perp c')/T_1^{-1}(H_0 \parallel c')=1:40$] можно объяснить различным числом кросс-релаксирующих частиц в двух этих ориентациях N_{\perp}^* и N_{\parallel}^* . Для расчета последних, автором работы совместно с Д.А.Таурским была предложена модель углового распределения частиц в магнитно-ориентированных порошках. С использованием полученной функции распределения расчет дал искомое соотношение $N_{\perp}^*/N_{\parallel}^* \approx 1:90$, что говорит в пользу верности наших представлений о причине анизотропии релаксационных параметров ЯМР жидкого ^3He . Обнаруженный эффект открывает перспективы использования магнитно-ориентированных порошков диэлектрических и парамагнитных для магнитного охлаждения жидкого ^3He и растворов ^3He - ^4He .

В пятой главе диссертации приводятся результаты исследования закономерностей протонной магнитной релаксации в дипольных изинговских ферромагнетиках TbES ($T_c=0,24\text{K}$) и DyES ($T_c=0,13\text{K}$) при сверхнизких температурах и оценка на основе установленных закономерностей времени корреляции флуктуирующих молекулярных полей, источником которых являются РЗ ионы.

В начале главы основное внимание сосредоточено на установлении топологии сильно неоднородных статических полей, расчету спектров ЯМР протонов различных групп, выявлению источников сильного неоднородного уширения линии ПМР. Здесь уста-

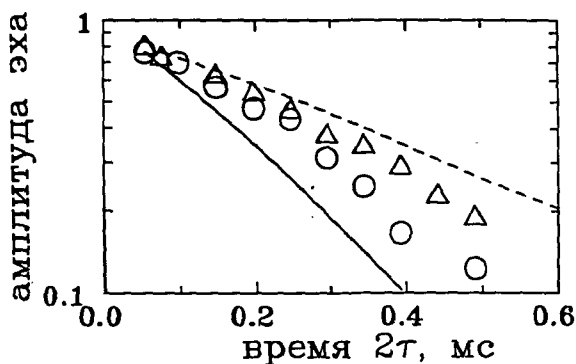


Рис. 5. Спад поперечної намагніченості ядер ^3He в образці І при орієнтації $H_0 \parallel c'$; Δ - $\nu = 8 \text{ МГц}$, $T = 0,075 \text{ К}$, штрихова лінія - то жє при $T = 1,5 \text{ К}$; \circ - $\nu = 16 \text{ МГц}$, $T = 0,12 \text{ К}$, сплошна лінія - то жє при $T = 1,5 \text{ К}$.

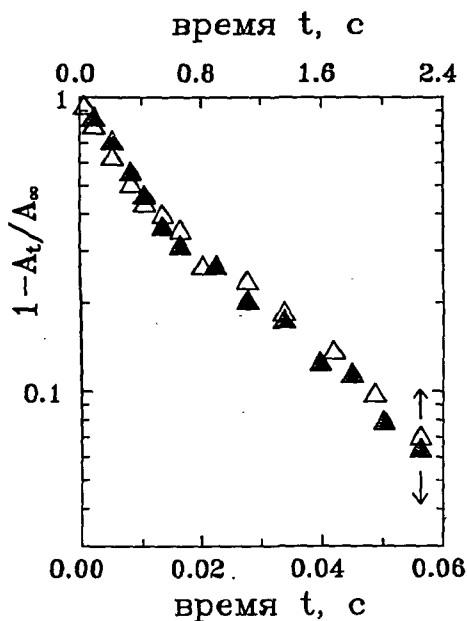


Рис. 6. Восстановление продольной намагніченості ^3He в образці ІІ при $T = 1,5 \text{ К}$, $\nu = 8 \text{ МГц}$: \blacktriangle - $H_0 \parallel c'$, Δ - $H_0 \perp c'$, $T'_{1t} / T'_{11} = 1:40$.

овлено, что расчеты резонансных частот дают хорошее согласие экспериментом в приближении чисто диполь-дипольных взаимодействий. Выявлено, что основным источником неоднородного уширения является дефектность кристаллической решетки этилсульфатов. Исследование температурной зависимости ширины линии ПМР протонов H5A позволило оценить разброс внутренних полей, обусловленный разориентацией ядерных моментов ^{159}Tb ; его вклад в неоднородную ширину составляет примерно одну треть от полной ширины при $T = 200 \text{ мК}$ и практически незаметен при 70 мК вследствие высокой поляризации ядер тербия при этих температурах.

Исследованию продольной и поперечной релаксации протонов, принадлежащих двум группам магнитно-эквивалентных ядер водорода (H5A в отсутствие внешнего поля при $T < T_c$ и в поле H_0 и H_c при температурах $70 \text{ мК} < T < 600 \text{ мК}$; H1A, B в поле H_c), посвящен следующий раздел главы. Здесь были исследованы температурная и полевая зависимости T_1^{-1} и T_2^{-1} (см., например, рисунки 7 и 8). Главные закономерности в релаксационных процессах протонов могут быть сформулированы следующим образом:

1. Процесс продольной релаксации аппроксимируется двухэкспоненциальным законом с характеристическими временами T_1 и T_1' . Процесс с коротким T_1 интерпретировался нами как установление теплового равновесия исследуемых протонов с ДДР РЗ ионов представлял главный интерес во всех экспериментах. Что касается медленного процесса (T_1'), то он, по-видимому, связан с энергетическим обменом ДДР с зеемановским резервуаром электронных моментов РЗ ионов и решеткой, с протонами других групп т.д.

2. Продольная и поперечная релаксация экспоненциально зависят от температуры: $T_{1,2}^{-1}(T) = W_{1,2} \exp(-\Delta/kT)$, где Δ - полное расщепление нижнего квазидублета иона Tb^{3+} в TbES ($\Delta_0 = 0,56 \text{ К}$, $g_{\parallel} = 17,82$, $g_{\perp} = 0$) и крамерсова дублета иона Dy^{3+} в DyES ($g_{\parallel} = 0,8$, $g_{\perp} = 0$).

3. Скорость релаксации поперечной намагниченности, кроме лагаемого, указанного выше, содержит независимый от температуры вклад, обязанный диполь-дипольному взаимодействию протонов одной группы.

Последний раздел главы посвящен описанию процедуры извлечения информации о спин-спиновой релаксации ионов Tb^{3+} в TbES

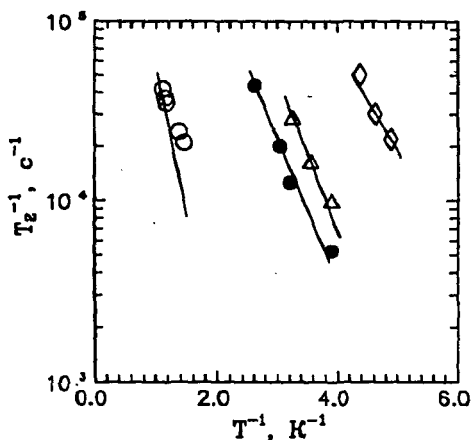


Рис.7. Температурная зависимость T_2^{-1} протонов H5A:

- - DyES, $H_{0z} = 26203$, $\nu = 13,4$ МГц, $T_2^{-1} = 2,9 \cdot 10^7 \exp(-2,2/kT)$;
- ▲ - TbES, $H_{0z} = 11169$, $\nu = 16,2$ МГц, $T_2^{-1} = 5,8 \cdot 10^7 \exp(-2,1/kT)$;
- ◇ - TbES, $H_{0z} = 0$, $\nu = 15,23$ МГц, $T_2^{-1} = 5,3 \cdot 10^7 \exp(-1,44/kT)$;
- - TbES, $H_{0z} = 37003$, $\nu = 13,4$ МГц, $T_2^{-1} = 1,75 \cdot 10^7 \exp(-4,8/kT)$

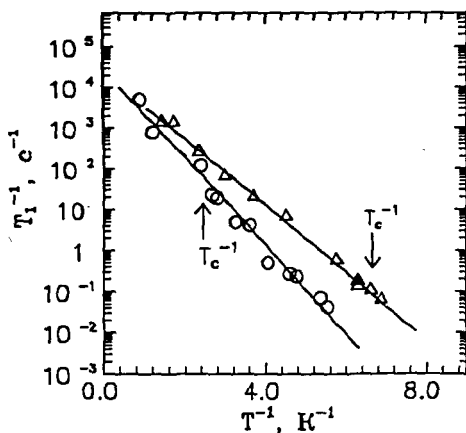


Рис.8. Температурная зависимость скорости продольной релаксации протонов H5A в кристаллах:

- - TbES, $H_{0z} = 16003$, $\nu = 16,2$ МГц;
- ▲ - DyES, $H_{0z} = 26203$, $\nu = 13,4$ МГц.

ионов Dy^{3+} в $DyES$ из экспериментальных данных о ядерной магнитной релаксации протонов в этих кристаллах. Существующие теоретические модели (Л.К.Аминова; Н.С.Бендиашвили и Л.Г.Корсава) предсказывали сильную полевую зависимость скорости электронной ССР Tb^{3+} , однако наши оценки ($2 \cdot 10^7 c^{-1}$) свидетельствуют об отсутствии полевой зависимости τ_2^{-1} . Для $DyES$ анализ экспериментальных результатов позволил установить, что τ_2^{-1} ионов Dy^{3+} не зависит от поля, температуры и составляет $2,5 \cdot 10^6 c^{-1}$.

Заключительная, шестая глава диссертации посвящена установлению закономерностей в магнитной релаксации ядер меди в иттрий-бариевой сверхпроводящей керамике $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Y_{1-x}Yb_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ методом ЯКР. Анализ экспериментальных данных по двум образцам с различным содержанием кислорода позволил выявить следующие закономерности:

1. Зависимость $T_2^{-1}(T)$ ядер $^{63}Cu(2)$ в обоих образцах (см. рисунки 9 и 10) имеет ступенчатый вид, спад T_2^{-1} при понижении температуры в обоих образцах начинается при $T \approx 100K$.

2. Для обоих образцов характерен локальный максимум в $T_2^{-1}(T)$ при температуре $T \approx 35K$, который был позднее наблюден рядом других авторов.

3. Температурная зависимость $T_1^{-1}(T)$ неплохо описывается в рамках теории магнитной релаксации М.В.Еремина и А.Ю.Завидонова, однако указанная теория не в состоянии полностью описать экспериментально установленную зависимость $T_2^{-1}(T)$.

Заключительный раздел главы посвящен исследованию влияния парамагнитной примеси ионов Yb^{3+} на магнитную релаксацию ядер меди. На основе анализа экспериментальных данных делается оценка времени корреляции флуктуаций магнитных полей от ионов Yb^{3+} при низких температурах.

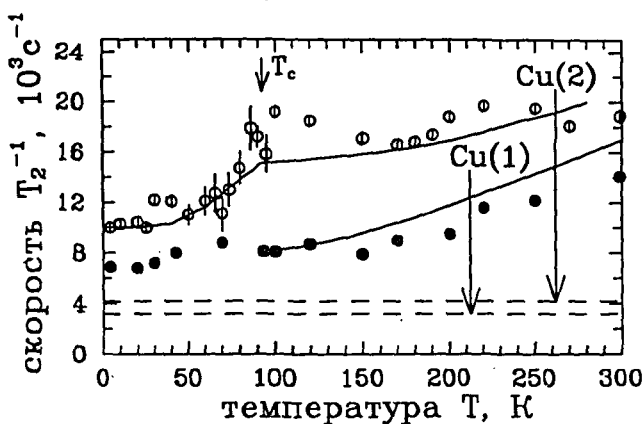


Рис. 9. Температурная зависимость скоростей поперечной релаксации ядер ^{63}Cu в образце I: сплошные линии - результат расчета по теории Еремина и Завидонова; штриховая линия - вклад в T_2^{-1} за счет магнитного диполь-дипольного взаимодействия.

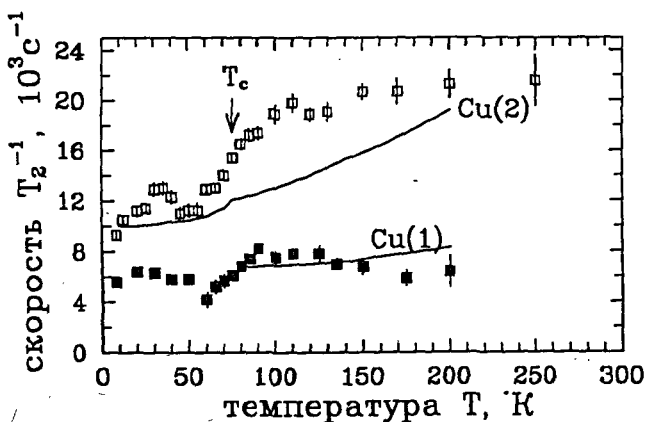


Рис. 10. Температурная зависимость скоростей поперечной релаксации ядер ^{63}Cu в образце II: сплошные линии - результат расчета по теории Еремина и Завидонова.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения программы экспериментальных исследований автором получены новые результаты по спиновой кинетике в веществах с сильной электронной корреляцией. Импульсным и стационарным методами ЯМР детально изучены закономерности ядерной магнитной релаксации в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках, в изинговских дипольных ферромагнетиках и высокотемпературных сверхпроводниках. Эксперименты были выполнены в широком диапазоне температур ($0,04-300\text{K}$), частот ($3-160\text{ МГц}$) и магнитных полей ($0-60\text{ кЭ}$). Основные выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Изучена природа формирования спинвого эха ядер тулия в аксиальных ван-флековских парамагнетиках. Установлено на примере кристаллов TmES и LiTmF_4 , что спиновое эхо в однородных магнитных полях удается наблюдать благодаря разбросу дипольных полей ядер диамагнитных лигандов.

2. В области повышенных температур ядерные спины РЗ ионов в ван-флековских парамагнетиках подвержены воздействию быстрых флуктуирующих сверхтонких полей, обусловленных реальными пере-скоками ван-флековских ионов между основным и ближайшим возбужденным состояниями. Установлено, что адиабатическая теория Андерсона-Вейса-Аминова, которая позволяет одновременно получить зависящие от температуры сдвиг резонансной частоты и ширину линии ЯМР, хорошо согласуется с экспериментом в пределе малых времен корреляции τ ($\tau\Delta\omega \ll 1$, где $\Delta\omega$ - соответствует сверхтонким расщеплениям) при ориентации магнитного поля вдоль кристаллографической оси c . При этом роль τ играет обратная вероятность перехода в единицу времени с возбужденных электронных состояний на основное. Малость времени корреляции оправдывает феноменологический подход, в соответствии с которым парамагнитный сдвиг линии ЯМР пропорционален статической парамагнитной восприимчивости кристалла.

3. Показано, что при повышенных температурах в произвольной ориентации магнитного поля, когда сверхтонкие поля на ядре РЗ иона меняются как по величине, так и по направлению, неадиабатическая теория Аминова объясняет основные закономерности релаксационных процессов, установленных нами на примере

кристаллов TmES и LiTmF_4 : экспоненциальную температурную зависимость продольной и поперечной ядерной магнитной релаксации, их анизотропию и частотную зависимость. Более того, она позволяет дать оценку времени жизни РЗ иона в возбужденном состоянии, лимитируемого процессами миграции возбуждения с одного иона на другой вследствие сильного спин-спинового взаимодействия. Из наших измерений следует, что время корреляции в кристалле TmES составляет $\tau_c \approx 10^{-10}$ с, а в кристалле LiTmF_4 $\tau_c \approx 10^{-11}$ с.

4. Обнаружено, что скорость продольной релаксации наименьшей величины ядер тулия в TmES при сверхнизких температурах ($T_1^{-1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) не зависит от величины магнитного поля в пределах 3 ± 59 кЭ, температуры в диапазоне 70 ± 100 мК и размера образца. Анализ экспериментальных данных и литературы позволяет сделать вывод о существовании неизвестного механизма релаксации, который является доминирующим в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках при сверхнизких температурах.

5. В результате экспериментальных исследований магнитной релаксации ядер жидкого ^3He , находящегося в контакте с диэлектрическими ван-флековскими парамагнетиками, обнаружено явление кросс-релаксации ядер ^3He и ^{169}Tm через границу раздела жидкого ^3He - монокристалл TmES и жидкий ^3He - магнитно-ориентированный порошок LiTmF_4 и TmPO_4 . Аналогичный эффект кросс-релаксации между ^3He и ядрами твердого азота ^{14}N ($I=1$) адсорбированного на поверхности CaF_2 и карболака, был обнаружен пять лет спустя в Корнельском университете Р.Ричардсоном и его сотрудниками. Предложен метод магнитного охлаждения жидкого ^3He и растворов ^3He - ^4He с использованием кросс-релаксационных процессов между ядерными спинами ^3He и ^{169}Tm .

6. Предложена модель углового распределения частиц в магнитно-ориентированных образцах, которая позволяет ввести параметр степени ориентированности образцов α , по физическому смыслу равный отношению магнитной энергии к тепловой. Н

(*) Enhanced magnetic relaxation of ^3He at substrate quadrupole frequency/Van Keuls F.W., Gramila T.J., Friedman L.J., Richardson R.C. -Physica B (North-Holland) -1990. -V.165&166. -P.717-718.

примере ориентированного порошка LiTmF_4 показано, что модель дает хорошее качественное согласие расчетных величин с экспериментально измеренными.

7. Анализ экспериментальных результатов ПМР в изинговских дипольных ферромагнетиках TbES и DyES позволил полностью разобраться в сложной картине внутренних статических магнитных полей, создаваемых ионами Tb^{3+} ($\mu_{\text{max}} = 8,91 \mu_B$) и Dy^{3+} ($\mu = 5,4 \mu_B$), и, в частности, соотнести эту картину с несовершенной структурой реальных кристаллов. Установлено, что внутренние поля достаточно точно вычисляются в приближении молекулярного поля и хорошо согласуются со спектрами ПМР. Неоднородная ширина линии ПМР (гауссовой формы) определяется, главным образом, дефектностью кристаллической решетки, которая влечет за собой "размытость" позиций ядер $|\delta r/r| \approx 3 \cdot 10^{-3}$, относящихся к одной группе, и вариации магнитного момента РЗ иона от одного узла к другому из-за 2+3%-го разброса параметра C_6^6 кристаллического потенциала DyES и TbES. В этилсульфате тербия значительный вклад в неоднородное уширение линий ПМР вносят ядерные моменты ^{159}Tb , с ростом поляризации которых при понижении температуры этот вклад исчезает. Однородная ширина линии при сверхнизких температурах определяется магнитным диполь-дипольным взаимодействием протонов одной группы.

8. Внутреннее магнитное поле, действующее на ядерные спины в кристаллах TbES и DyES, содержит помимо статической компоненты флуктуирующую часть, обязанную спин-спиновой релаксации РЗ ионов. Флуктуирующее магнитное поле индуцирует магнитную релаксацию протонов, скорость которой экспоненциально зависит от температуры $T_{1,2}^{-1} = W_{1,2} \exp(-\Delta/kT)$. Время корреляции флуктуаций магнитных полей содержится в предэкспоненциальном множителе и может быть оценено в результате анализа температурных зависимостей $T_{1,2}^{-1}(T)$. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что, вопреки априорным представлениям об отсутствии спин-спиновой релаксации в системе с нулевыми поперечными компонентами магнитных моментов РЗ ионов, спин-спиновая релаксация протекает в кристаллах TbES и DyES с характеристическими временами $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ и $\tau_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, соответственно, и не зависит от величины магнитного поля и температуры. Процедура извлечения τ_2 из экспериментально установ-

ленных зависимостей $T_{1,2}^{-1}(T)$ наиболее проста в том случае, когда величина флуктуирующих полей намного меньше величины статического магнитного поля.

9. В экспериментальных исследованиях ЯКР меди в иттрий-бариевой керамике обнаружен ряд важных особенностей взаимодействия ядерных и электронных моментов в ВТСП нестехиометрического состава. Так, например, в температурной зависимости $T_2^{-1}(T)$ ядер ^{63}Cu в медь-кислородных плоскостях $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ было обнаружено резкое замедление скорости спин-спиновой релаксации при $T < T_c$, приписываемое нами исчезновению флуктуирующих полей от d-электронов меди в сверхпроводящей фазе. Нам представляется, что время корреляции τ_c флуктуирующих магнитных полей есть характеристическое время перескока дырок в медь-кислородных плоскостях. На основе наших экспериментов оценка дает величину $\approx 1,4 \cdot 10^{-15}$ с. Другой важной особенностью в температурной зависимости $T_2^{-1}(T)$ является локальный максимум вблизи температуры $T = 35\text{K}$, существование которого было подтверждено в ряде независимых экспериментов за рубежом. Природа этой особенности остается невыясненной до настоящего времени. В результате экспериментов с образцами "1-2-3", содержащих различное количество примесных ионов Yb^{3+} , установлено, что при концентрации последних более 1% временем корреляции флуктуаций магнитных полей на ядрах меди при низких температурах становится время спин-спиновой релаксации ионов иттербия. По нашим оценкам, оно составляет при гелиевой температуре $\tau_c \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с.

Содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Аминов Л.К., Тагиров М.С., Теплов М.А. Температурная зависимость сдвига и ширины линии ЯМР в ван-флековских парамагнетиках // ЖЭТФ. - 1982. - Т. 82. - вып. 1. - С. 224-229.

2. Ядерная релаксация в ван-флековских парамагнетиках, обусловленная флуктуациями сверхтонкого магнитного поля / Аминов Л.К., Кудряшов А.А., Тагиров М.С., Теплов М.А. - ЖЭТФ. - 1984. - Т. 86. - вып. 5. - С. 1791-1802.

3. О поляризации ядер РЗ ионов в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках / Володин А.Г., Егоров А.В., Тагиров М.С., Теплов М.А., Феллер Г., Швабе Х., Штаудте М. - Письма в ЖЭТФ. - 1986. - Т. 43. - № 6. - С. 295-296.

4. An attempt to cool liquid ^3He by the Van-Vleck para-magnet LiTmF_4 /Manninen M.T., Pekola J.P., Nenonen S.A., Tagirov M.S.-17th.Int.Conf.Low Temp.Phys. (Karlsruhe, 1984):-Proc. P.1163.

5. Экспериментальное и теоретическое исследование магнитного резонанса ядер водорода в кристаллах этилсульфатов редких земель при сверхнизких температурах/ Аминов Л.К., Володин А.Г., Кропотова Т.В., Налетов В.В., Сафиуллин А.Р., Тагиров М.С., Теплов М.А.- В сб.:Парамагнитный резонанс.Вып.22.- Казань:Изд.Казан.ун-та,1988.- С.131-222.

6. ^1H NMR study of static and fluctuating internal fields in $\text{Tb}(\text{C}_2\text{H}_5\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ Ising ferromagnet/ Aminov L.K., Egorov V.V., Volodin A.G., Naletov V.V., Tagirov M.S., Teplov M.A., Keller G.- Appl. Magn.Reson.- 1990.- V.1.- No 1.- P.113-125.

7. Магнитная релаксация протонов в этилсульфатах редких земель/ Володин А.Г., Сафиуллин А.Р., Тагиров М.С., Теплов М.А.-Всесоюзн. конф.по магнитному резонансу в конденсированных средах (физические аспекты) (Казань. 20-22 июня 1984г.): Тез. докл.- Ч.3.-С.14.

8. Ядерная магнитная релаксация в этилсульфате тербия при сверхнизких температурах/ Володин А.Г., Сафиуллин А.Р., Тагиров М.С., Теплов М.А.- XXIII Всесоюзн.совещ.по физ.низк. темп. (Таллин, 23-25 окт.1984г.): Тез.докл.- Ч.3.- С.76-77.

9. Nuclear magnetic relaxation in rare-earth ethylsulphates at ultralow temperatures/Aminov L.K., Volodin A.G., Tagirov M.S., Teplov M.A.- 2-nd Intern. Conf. on Modern Methods of Radiospectroscopy.- Suppl.- Reinhardbrunn (DDR).-Proc.- 1985.- P.40-57.

10. Исследование статических и флуктуирующих магнитных полей в кристаллах изинговских ферромагнетиков $\text{Ln}(\text{C}_2\text{H}_5\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}$)/ Аминов Л.К., Володин А.Г., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- XXV Всесоюзн. конф. по физ.низк. темп.(Ленинград, 25-27 окт.1988г.):Тез. докл.- Ч.2.- С.114-115.

11. Релаксация намагниченности ядер ^1H в ферромагнитном этилсульфате тербия/ Аминов Л.К., Володин А.Г., Кропотова Т.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- XXIV Всесоюзн. совещ. по физ. низк. темп.(Тбилиси, 8-10 сент.1986г.): Тез.

докл. - Ч.3. - С.81-82.

12. Ядерный магнитный резонанс в системе La-Sr-Cu-O/ Жданов Р.Ш., Егоров А.В., Бахарев О.Н., Тагиров М.С., Теплов М.А.-Раб.совещание по проблемам высокотемпературной сверхпроводимости (Свердловск, 1987): Тез.докл. - Ч.1. - С.202-203.

13. Модели центров квадрупольного резонанса ядер меди в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Еремин М.В., Грабой И.Э., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.-Письма в ЖЭТФ.-1989.- Т.49.- вып.8.- С.446-448.

14. Ядерный квадрупольный резонанс и ядерная магнитная релаксация в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Завидонов А.Ю., Еремин М.В., Бахарев О.Н., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А. - Сверхпроводимость: физика, химия и техника.- 1990.-Т.3.- № 8.- Ч.1.- С.

15. Модели магнитной релаксации спинов $\text{Cu}(2)$ в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ /Завидонов А.Ю., Еремин М.В., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А., Чеботаев Н.М.- Письма в ЖЭТФ.- 1989.- Т.50.- вып.4.- С.179-181.

16. ^{63}Cu NQR and nuclear relaxation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Zavidonov A.Yu., Eremin M.V., Egorov A.V., Naletov V.V., Tagirov M.S., Teplov M.A.- USSR-FRG Bilateral seminar (Tallinn, 1990): -Proc.- P.255-256.

17. Володин А.Г., Тагиров М.С., Теплов М.А. Рефрижератор растворения ^3He в ^4He для ЯМР-исследований при сверхнизких температурах// Всесоюзн. конф. по применению магн. резонанса в народном хоз-ве. (Казань, 22-24 июня 1988г.):Тез.докл. - Ч.1.- С.81.

18. The influence of crystalline structure defects on magnetic resonance spectra/ Aukhadееv F.L., Zhdanov R.Sh., Kudryashov A.A., Tagirov M.S., Teplov M.A.-Proc of I-st Soviet-Indian Symp. Actual problems of magnetic resonance spectroscopy of inorganic materials (Dushanbe, 1982):-Abs.- P.51-52.

19. Локальные искажения симметрии центров Tm^{3+} в LiTmF_4 /Аухадеев Ф.Л., Жданов Р.Ш., Кудряшов А.А., Тагиров М.С., Теплов М.А.- VII Всесоюзный симпозиум по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов (Ленинград, 19-22 окт.1982):Тез.докл.- С.112.

20. Локальные искажения симметрии кристаллического электрического поля в редкоземельных соединениях со структурой шелита/ Кудряшов А.А., Кораблева С.Л., Тагиров М.С., Теплов М.А. - ФТТ.- 1983.- Т.25.- вып.6.- С.1887-1889.

21. Обнаружение прямой магнитной связи ядер жидкого ^3He с ядрами ^{169}Tm в кристалле этилсульфата тулия/ Егоров А.В., Аухадеев Ф.Л., Тагиров М.С., Теплов М.А. -Письма в ЖЭТФ. 1984.-Т.39.-N10.-С.480-482.

22. Резонансная связь ядер жидкого ^3He с ядерными спинами твердого тела/ Егоров А.В., Аухадеев Ф.Л., Тагиров М.С., Теплов М.А.-23-е Всесоюз.совещ.по физ.низк.темп.(Таллин, 1984):- Тез.докл.- Ч.1.- С.50-51.

23. Егоров А.В., Аухадеев Ф.Л., Тагиров М.С. Обнаружение прямой магнитной связи ядер жидкого ^3He с ядрами ^{169}Tm в кристалле этилсульфата тулия// Всесоюз.конф.по магн.рез.в конденс. средах (физические аспекты)(Казань, 1984):-Тез.докл.-Ч.2.- С.139.

24. Егоров А.В., Тагиров М.С., Теплов М.А. Магнитная релаксация жидкого ^3He в порошках LiTmF_4 // Материалы итоговой научной конф. за 1989 год (Естеств.и точн.науки)- Казань, 1990.- С.15-19.

25. Егоров А.В., Тагиров М.С., Теплов М.А. Магнитная релаксация жидкого ^3He в ориентированном порошке LiTmF_4 .-24-е Всесоюз. совещ. по физ.низк.темп.(Тбилиси, 1986):-Тез.докл.- Ч.1.- С.13-14.

26. Liquid ^3He magnetic relaxation in LiTmF_4 oriented powder/ Aminov L.K., Egorov A.V., Tagirov M.S., Teplov M.A.- 5-th AMPERE summer school.(Novosibirsk, 1987):-Abs.- P.40.

27. Ядерная магнитная релаксация жидкого ^3He в порах ориентированного порошка LiTmF_4 / Егоров А.В., Бахарев О.Н., Володин А.Г., Кораблева С.Л., Тагиров М.С., Теплов М.А. ЖЭТФ.-1990.-Т.97.-N4.-С.1175-1187.

28. Володин А.Г., Тагиров М.С., Теплов М.А. Релаксация поперечной намагниченности ядер ^{169}Tm в этилсульфате тулия при низких температурах/ I-е Всесоюз.совещ.по спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (Москва, 1985):- Тез.докл.- С.90.

29. Nuclear spin-lattice relaxation of ^{169}Tm in TmES at

ultralow temperatures/ Volodin A.G., Egorov A.V., Naletov V.V., Tagirov M.S., Teplov M.A.- IX-th AMPERE summer school (Novosibirsk, 1987):-Abs.- P.165.

30. Aminov L.K., Tagirov M.S., Teplov M.A. Nuclear magnetic relaxation in rare-earth compound crystals/ VII Intern.conf.of hyperfine interactions.(Prague,1989):-Abs. P.B4-4.

31. Nuclear magnetic relaxation in rare-earth crystals due to fluctuations of hyperfine magnetic fields/Aminov L.K., Tagirov M.S., Teplov M.A., Volodin A.G.- Hyperfine Interactions.-1990.-V.59.- P.255-270.

32. Уменьшение скорости поперечной релаксации ядер ^{63}Cu $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ / Бахарев О.Н., Жданов Р.Ш., Егоров А.В., Еремин М.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.-Письма в ЖЭТФ. 1988.-Т.47.- Вып.8.- С.383-385.

33. Ширина линии ЯКР ^{63}Cu в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Бахарев О.Н., Егоров А.В., Еремин М.В., Жданов Р.Ш., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.-I Всесоюз.совещ.по высокотемп.сверхпровод. (Харьков,1988):-Тез.докл.- Т.2.- С.91-92.

34. Исследование локальных полей на ядрах ^{63}Cu $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ методом ЯКР/ Бахарев О.Н., Жданов Р.Ш., Егоров А.В., Еремин М.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- II Всесоюз.конф.по физ.магн.явления. (Калинин,1988):-Тез.докл. С.35-35.

35. Сужение однородной ширины линии ЯКР ^{63}Cu $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при $T < T_c$ / Бахарев О.Н., Жданов Р.Ш., Егоров А.В., Еремин М.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- 25-е Всесоюз.совещ.по физ.низк.темп. (Ленинград,1988):-Тез.докл.-Ч.1.- С.296-297.

36. Модели центров ЯКР меди в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Еремин М.В., Грабой И.Э., Завидонов А.Ю., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- II Всесоюз.конф.по высокотемп. сверхпровод. (Киев,1989):-Тез.докл.- Т.1.- С.192.

37. ЯМР и ЯКР в высокотемпературной сверхпроводящей керамике/ Бахарев О.Н., Егоров А.В., Жданов Р.Ш., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- Материалы итоговой научн. конф. 3. 1987 год (Естеств.и точн.науки)-Казань,1989.- С.43-45.

38. ЯКР меди и спаривание 3d-2p дырок в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Еремин М.В., Грабой И.Э., Завидонов А.Ю., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А.- Материалы итоговой научн. конф. 3. 1987 год (Естеств.и точн.науки)-Казань,1989.- С.43-45.

н М.В., Бахарев О.Н., Жданов Р.Ш., Грабой И.Э., Завидонов Ю., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А. - X Жд.симп.по эффекту Яна-Теллера. (Кишинев, 1989): -Тез. докл. - 57.

39. ^{63}Cu nuclear spin-spin relaxation and local singlet pairing model in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Eremin M.V., Graboy I.E., Egorov V., Naletov V.V., Tagirov M.S., Teplov M.A. - Intern.sem.on high temp. supercond. (Dubna, 1989): -Abs. - P.69.

40. Ядерная магнитная релаксация ^{63}Cu в соединениях $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.82}$ / Бахарев О.Н., Егоров А.В., Налетов В.В., Тагиров М.С., Теплов М.А. - 26-е Всесоюз.совещ.по физ. низк.темп. (Донецк, 1990): -Тез.докл. - Ч.1 - С.44-45.

41. ^{63}Cu nuclear magnetic relaxation in YBaCuO / Bakharev V., Egorov A.V., Tagirov M.S., Teplov M.A. - XXV Congress of Phys. (Stuttgart, 1990): -Extend abs. - P.271-272.

42. Models of ^{63}Cu NQR centers and nuclear relaxation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Eremin M.V., Anikeenok O.A., Egorov A.V., Naletov V., Tagirov M.S., Teplov M.A., Chebotaev N.M. - Progr. High Temp. Supercond. - 1990. - V.21. - P.538-543.

43. Спин-решеточная релаксация ядер ^{63}Cu в $\text{Yb}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ при низких температурах / Налетов В.В., Егоров А.В., Жданов Р.Ш., Тагиров М.С., Теплов М.А. - ФНТ. - 1991. - Т. 17, No 10. - P.1341-1344.

44. ^{63}Cu spin-lattice relaxation in $\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ at low temperatures / Naletov V.V., Egorov A.V., Zhdanov R.Sh., Tagirov M.S., Teplov M.A. - Int. conf. of HTSC-LP (Moscow, May 15-19, 1991): Abs. - P. S12.

45. Спин-решеточная релаксация ядер ^{63}Cu в $\text{Yb}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ / Налетов В.В., Егоров А.В., Жданов Р.Ш., Тагиров М.С., Теплов М.А. - Всес. совещ. по ВТСП (Харьков, 15-19 июля, 1991 г.): Тез. докл. - Т. 1. - С.217-218.

46. Дипольная ширина линии ЯМР ^{169}Tm в этилсульфате туги / Егоров А.В., Кудряшов А.А., Тагиров М.С., Теплов М.А. - ФТД. - 1984. - Т.26. - Вып.7. - С.2223-2225.

47. Перенос 4f-электронных возбуждений и магнитная релаксация ядер ^{169}Tm в ван-Флековском парамагнетике LiTmF_4 / Егоров А.В., Кудряшов А.А., Тагиров М.С., Теплов М.А. - ФТД. - 1986. - Т.28. - Вып.2. - С.630-632.

48. Магнитная релаксация жидкого ^3He в порошках ва-
флековских парамагнетиков/ Егоров А.В., Кораблева С.Л., Таги-
ров М.С. Теплов М.А., Мезенцева Л.П.- 25 Всес. совещ. по фи-
зике низк. темп. (Ленинград, 25-27 октября, 1988г.): Тез. докл. - Ч.2.
С.30-31.

49. Тагиров М.С., Таюрский Д.А. ЯМР в магнитно
ориентированных порошках.-Симпозиум "Магнитный резонанс-9
(MR-91)(Казань, 1991г.): - Мат.смп. - С.59-63.

50. Тагиров М.С., Таюрский Д.А. Форма линии ЯМР в магнитно-
ориентированных порошках при низких температурах.- XXIX со-
вещание по физике низких температур (Казань, 1992 г.): - Тез.
докл. - Ч.3- С.Т81.

51. Tagirov M.S., Tayurskii D.A. The angular distribution
model of particles in magnetically oriented powders.- 26-
Congress AMPERE on magnetic resonance (Athens, 1992):-Extended
Abs.- P.80-81.

